第41卷 第1期 干 旱 区 研 究 Vol. 41 No. 1
2024年1月 ARID ZONE RESEARCH Jan. 2024

不同施氮水平对油莎豆农田土壤养分表观平衡和块茎产量的影响

曹秫琦[1]， 路战远[1]， 任永峰[1]， 赵小庆[1]， 王建国[1]， 侯智慧[1]，
韩云飞[1]， 王登云[2]， 尚学燕[2]， 段 锐[2]

(1. 内蒙古农牧业科学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古巴彦淖尔市磴口县农牧业技术推广中心，
内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘 要：研究不同施氮水平下沙质土壤油莎豆(*Cyperus esculentus*)土壤养分表观平衡及块茎产量，为沙质土壤油莎豆科学施氮提供理论依据。以油莎豆品种“中油莎1号”为研究对象，分别设置0 kg·hm^{-2}(N0)、75 kg·hm^{-2}(N1)、150 kg·hm^{-2}(N2)、225 kg·hm^{-2}(N3)4个施氮水平。分析4个施氮水平对油莎豆农艺性状、土壤表观养分平衡及块茎产量的影响。结果表明：随着施氮量增加，两地油莎豆茎蘖数、株高、单片叶面积等均有增加，但过高的施氮量会造成油莎豆地上部徒长，导致产量下降；施氮量为150 kg·hm^{-2}(N2)，油莎豆最大根长、根体积等农艺性状最优，油莎豆整株干重及块茎产量均最高，块茎鲜产可达到9298.87~10336.06 kg·hm^{-2}；两地氮素表观盈余率在0 kg·hm^{-2}(N0)和75 kg·hm^{-2}(N1)水平下均为负值，150 kg·hm^{-2}(N2)和225 kg·hm^{-2}(N3)水平下均为正值，表明两地氮素均在N2水平即施氮量为150 kg·hm^{-2}时达到氮素平衡状态。冗余分析也表明油莎豆茎蘖数、最大根长、根体积、氮携出量是驱动油莎豆干物质及块茎产量形成的主要因素。因此在北方沙质土壤条件下，N素施入量为150 kg·hm^{-2}时，可促进油莎豆对养分的吸收、维持土壤表观养分平衡，有利于油莎豆良好的生长发育和产量的提高。

关键词：油莎豆；施氮水平；农艺性状；块茎产量；土壤养分表观平衡

油莎豆(*Cyperus esculentus*)又称油莎草，铁荸荠等。是集粮油、食品、医药、饲料、绿化于一体的新型经济作物，也是防风固沙、提高土壤肥力及边际土地利用率的理想绿色植物[1]。其地下块茎含有丰富的油脂、碳水化合物、蛋白质、矿物质及维生素等多种营养成分[2]，并作为可食用作物几乎在世界所有大陆(非洲、欧州、亚洲、美洲及大洋洲)都有应用[3-4]。现在我国西北地区、东北地区、黄淮地区等土壤沙化较严重地区均有种植，近几年我国的种植面积都维持在1.7×10^4 hm^{2}左右[5]。在沙质土、盐碱土、黑土等土壤类型上均可种植，其中最适宜在沙质土壤上种植。研究表明，待油莎豆成熟后可将其叶、根及地下块茎翻埋于地下作为培肥土地的营养源，3~5 a后可使退化的植物群落恢复到较佳状态[6]。此外国外报道，一粒油莎豆种子一年内能在3 m^{2}的面积内长出1900株新植株并结出近7000粒新块茎，可显著的改善生态环境[7]。

施肥是使作物增产最快速、最主要的措施之一，其中氮肥在作物高产栽培中起着至关重要的作用[8]。施用氮肥可促进作物生长，提高作物产量，并影响作物的营养品质[9]。但即使采用最好的栽培技术，实际上也只有30%～40%以尿素形式施用的氮被作物吸收，而过多的氮肥不但不会增加作物的经济效益，还会造成浪费和污染[10]。因此，合理的氮肥施入是提高肥料利用率，增加作物经济效益的关键措施。前人对于油莎豆施肥的研究表明，增加施氮量可以提高油莎豆单穴粒数和总粒数及产量[11]。对于马铃薯养分的研究表明，增施氮肥可提高马铃薯对N、P、K的吸收，其中，中氮水平的马铃薯各器官N、P、K质量分数最高[12]。对于土壤养分平衡的

收稿日期：2023-08-11； **修订日期**：2023-10-10
基金项目：国家重点研发计划(2019YFC0507602)
作者简介：曹秫琦(1995-)，男，硕士研究生，主要从事植物学研究. E-mail: CZQ123cao@126.com
通讯作者：路战远. E-mail: lzhy281@163.com

研究表明，施氮量会影响作物产量及土壤养分平衡[13]。也有学者提出，过量施肥会造成土壤中养分的不均衡，从而影响作物生长[14]。近年来关于油莎豆的研究多集中于栽培模式、品种筛选等方面，鲜有针对北方沙质土壤油莎豆施氮量及土壤养分表观收支的研究。前人在探究油莎豆本身需氮规律的同时，对土壤养分表观收支状况的研究有待完善。本研究针对沙质土壤油莎豆施氮不明确的问题，在内蒙古巴彦淖尔市磴口县及呼和浩特市托克托县设置两个试验点，分别设置0 kg·hm^{-2}(N0)、75 kg·hm^{-2}(N1)、150 kg·hm^{-2}(N2)、225 kg·hm^{-2}(N3)4个施氮水平，分析4个不同施氮水平对油莎豆农艺性状、整株干重、块茎产量及土壤表观养分收支影响。为明确沙质土壤油莎豆最佳施氮量，提高油莎豆块茎产量，维持土壤表观养分平衡提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年分别在内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县兴泰家庭农牧场(106°56′E，40°32′N)和呼和浩特市内蒙古自治区农牧业科学院托克托县试验基地(111°25′E，40°30′N)进行，两地区均属温带大陆性季风气候，生态类型相似。光照充足，热量丰富，年平均气温为6~8 ℃，有效积温分别为3015 ℃、2795 ℃，年均蒸发量分别为1784 mm、2493 mm，年平均风速分别为2.6 m·s^{-1}、1.6 m·s^{-1}。当地耕层土壤肥力整体状况较差，土壤类型均为风沙土，前茬作物均为玉米。具体理化性质见表1。

1.2 试验设计

小区采用随机区组排列，每个处理3次重复，共12个小区，小区面积24 m^2(4 m×6 m)。播种方式为穴播，行距50 cm，穴距15 cm，种植密度为13.33×10^{4}穴·hm^{-2}，每穴播种3粒。于5月25日进行播种，10月5日收获。供试油莎豆品种为“中油莎1号”。灌水采用滴灌，总灌水量为1200 m^3·hm^{-2}。各处理的整个生育过程中耕、灌水、除草等田间管理保持一致。

设置0 kg·hm^{-2}(N0)、75 kg·hm^{-2}(N1)、150 kg·hm^{-2}(N2)、225 kg·hm^{-2}(N3)4个氮肥水平，其中N0水平为不施氮水平，N2水平的施肥量是根据当地油莎豆施氮肥量及土壤基础肥力确定，N1、N3水平施氮量分别在N2水平的基础上增减50%。各处理的磷肥(P_2O_5)用量均为240 kg·hm^{-2}，钾肥(K_2O)用量均为120 kg·hm^{-2}。氮肥采用尿素(纯N ≥46%)、磷肥采用过磷酸钙(P_2O_5 ≥16%)、钾肥采用硫酸钾(K_2O ≥50%)，氮、磷、钾肥均作为基肥，播种时一次性施入。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 *油莎豆农艺性状测定* 在收获前(10月2日)各小区取3株油莎豆测定其株高、茎蘖数、单片叶面积、最大根长、根体积。其中株高、茎蘖数采用直接测量法。由于快速分蘖期后油莎豆茎蘖数快速增加，无法取到单穴油莎豆的所有分蘖株，以植株为中心选取0.3 m×0.3 m面积定义为单穴油莎豆的所有分蘖数，采用全挖法将带有土体的完整根系挖出，抖净根系所带土壤。用米尺测量植株最大根长；用清水洗净根部，摘下所有块茎后采用“排水法”[15]测定根体积。油莎豆单片叶面积采用长宽系数法[16]；油莎豆植株收获后，在105 ℃杀青0.5 h，然后80 ℃烘干至恒重，测定油莎豆整株干重。

1.3.2 *油莎豆植株养分测定* 将烘干后的油莎豆植株分为茎叶、根、块茎三部分，分别粉碎、过2 mm筛，保存以测定油莎豆植株养分。植株样品用H_2SO_4–H_2O_2消煮，全氮用凯氏定氮法；全磷用钒钼黄比色法；全钾用火焰光度计法测定。

1.3.3 *油莎豆块茎产量测定* 由于油莎豆分蘖能力较强，且分蘖株在其周围的空间具有一定拓展、交叉的能力，因此为保证样方数据的代表性，本试验选取各小区中间带(0.5 m×0.5 m)的小面积多点测定的方法进行块茎产量测定。

1.4 数据分析与处理

植株养分携出量(kg·hm^{-2})=Σ植株各器官干重

表1 试验地土壤理化性状

Tab. 1 Physical and chemical properties of tested soil

试验地	pH	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
托克托县	8.35	12.12	1.02	1.29	10.85	7.92	49.7
磴口县	8.96	8.86	0.73	0.6	6.8	3.65	38.78

(kg·hm^{-2})×养分含量(%);

养分平衡采用表观平衡法[17]计算:养分平衡值(kg·hm^{-2})=养分投入量(kg·hm^{-2})-作物携出量(kg·hm^{-2});

养分盈余率(%)=[平衡值(kg·hm^{-2})/作物携出量(kg·hm^{-2})]×100。

养分投入量仅包括化肥投入量;携出量仅包括作物收获而带出的养分。

利用Excel 2010进行数据整理和分析,IBM SPSS Statistics-22软件进行显著性检验。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和Duncan检验法进行所有组间均值的比较,检测不同数据组间的差异显著性。使用Origin 2021进行绘图和冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对油莎豆农艺性状的影响

由表2可知,与不施氮肥水平相比,施氮肥不仅可以改善油莎豆株高、茎蘖数和单片叶面积等地上部农艺性状,而且还能改善根长和根体积等地下部农艺性状。随着施氮量的增加,油莎豆茎蘖数、株高、单片叶面积均呈上升趋势,在N3水平时均达到最高,且茎蘖数、株高与N0水平差异显著(P>0.05)。N3水平下两地茎蘖数比N0水平提高了38.89%、26.09%,比N1水平提高了25.00%、20.83%,比N2水平分别提高了0.00%、3.57%;株高比N0水平提高了18.50%、29.77%,比N1水平提高了12.79%、19.31%,比N2水平提高了3.64%、12.31%;单片叶面积比N0水平提高了7.18%、18.83%,比N1水平提高了4.43%、9.08%,比N2水平提高了0.46%、3.75%。

在地下部农艺性状中最大根长、根体积随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势,在N2水平下达到最大。两地N2水平下最大根长较N0水平提高了13.95%、11.16%,较N1水平提高了4.35%、1.92%,较N3水平分别提高了14.54%、3.50%;根体积较N0水平提高了22.18%、13.50%,较N1水平提高了2.19%、7.59%,较N3水平分别提高了12.84%、8.10%。但各水平下最大根长差异不显著。

2.2 不同施氮水平对油莎豆整株干重及块茎产量的影响

如表3所示,托克托县和磴口县N0水平下油莎豆整株干重均最低,且随着施氮量的增加,油莎豆整株干重表现为先升高后降低的趋势,在N2水平下

表2 不同施氮水平下油莎豆农艺性状

Tab. 2 Agronomic traits of *Cyperus esculentus* under different nitrogen levels

水平	茎蘖数/个		株高/cm		单片叶面积/cm^2		最大根长/cm		根体积/cm^3	
	托克托县	磴口县	托克托县	磴口县	托克托县	磴口县	托克托县	磴口县	托克托县	磴口县
N0	18.00±0.58b	23.00±2.08b	58.93±0.91c	60.47±4.84c	48.62±2.33a	46.51±5.43b	19.57±3.07a	23.93±1.08a	59.11±1.68c	66.67±4.51b
N1	20.00±1.07b	24.00±2.08ab	61.91±3.17bc	65.77±1.79bc	49.90±3.58a	50.67±3.23ab	21.37±4.00a	26.10±1.32a	70.67±4.16ab	70.33±3.06ab
N2	25.00±1.00a	28.00±4.16ab	67.38±2.94ab	69.87±1.99b	51.87±2.10a	53.27±2.39ab	22.30±1.70a	26.60±3.03a	72.22±3.42a	75.67±0.58a
N3	25.00±2.52a	29.00±2.00a	69.83±4.83a	78.47±1.30a	52.11±0.85a	55.27±3.33a	19.47±3.59a	25.70±1.40a	64.00±5.29bc	70.00±4.36ab

注:表中数据为平均值±标准误(n=3);不同小写字母表示不同施氮水平油莎豆农艺性状差异显著(P<0.05)。

表3 不同施氮水平下油莎豆干重及块茎产量

Tab. 3 Dry weight and tuber yield of *Cyperus esculentus* under different nitrogen levels

水平	整株干重/(g·株$^{-1}$)		块茎产量/(kg·hm^{-2})	
	托克托县	磴口县	托克托县	磴口县
N0	118.87±2.49c	117.78±2.56b	7346.53±38.56d	8874.79±45.99d
N1	126.60±2.19ab	127.40±4.84ab	8787.10±25.19c	9658.92±37.73c
N2	132.40±3.12a	138.81±4.07a	9298.87±37.33a	10336.06±28.31a
N3	128.07±1.27ab	135.78±1.91a	8997.53±88.69b	9910.80±32.82b

注:表中数据为平均值±标准误(n=3);不同小写字母表示不同施氮水平油莎豆干重、产量差异显著(P<0.05)。

达到最大，两地分别为132.40 g·株$^{-1}$、138.81 g·株$^{-1}$，显著高于N0水平，但与N1、N3水平无显著性差异。托克托县和磴口县N0水平下油莎豆块茎鲜产也为最低，油莎豆块茎鲜产亦随着施氮量的增加表现为先升高后降低的趋势，在N2水平下达到最大且显著高于其他水平，两地鲜产分别为9298.87 kg·hm^{-2}、10336.06 kg·hm^{-2}。分别比N0水平提高了26.57%、16.47%，比N1水平提高了5.82%、7.01%，比N3水平提高了3.28%、4.29%。

2.3 不同施氮水平下土壤养分收支平衡

如表4所示，随着施氮量的增加，两地油莎豆氮素携出量均表现为先增加后下降的趋势，托克托县氮素携出量在128.07~139.54 kg·hm^{-2}，磴口县在108.56~132.94 kg·hm^{-2}。两地氮素携出量均在N2水平下达到最大，相较于N0水平，氮素携出量分别提高了8.96%、22.46%。氮素表观平衡值大小两地均表现为N3>N2>N1>N0。两地氮素表观盈余率均在N0和N1水平下为负值，在N2和N3水平下为正值。表明两地均在氮施入量为150 kg·hm^{-2}下达到氮素平衡状态。

此外施氮水平还会影响磷素、钾素的养分收支平衡。两地油莎豆磷、钾素携出量亦表现为先增加后下降的趋势，托克托县和磴口县磷素携出量分别在27.14~31.68 kg·hm^{-2}、17.62~22.75 kg·hm^{-2}；钾素携出量分别在151.18~167.59 kg·hm^{-2}、87.70~95.85 kg·hm^{-2}。本试验两地各施氮水平下磷素表观盈余率均为正值，说明磷素处于盈余状态。而钾素表观盈余率在托克托县均为负值，在磴口县均为正值，说明在托克托县钾素处于亏缺状态，在磴口县钾素处于盈余状态，可能是由于土壤基础条件的不同造成。这说明合理的氮肥施入可促进作物对营养元素的吸收，从而为作物高产优质奠定基础。

2.4 农艺性状、养分携出与干重、产量的冗余分析

如图1所示，对油莎豆农艺性状、养分携出与干

表4 不同施氮水平下油莎豆土壤体系中的氮、磷、钾素平衡

Tab. 4 N, P and K balance in *Cyperus esculentus* soil system under different nitrogen levels

水平			N0	N1	N2	N3
氮表观平衡	总投入量/(kg·hm^{-2})	托克托县	0	75	150	225
		磴口县	0	75	150	225
	总携出量/(kg·hm^{-2})	托克托县	128.07±5.05b	132.93±3.44ab	140.06±4.03a	139.54±0.89a
		磴口县	108.56±5.23c	125.19±5.77b	134.63±2.97a	132.94±4.55ab
	表观平衡值/(kg·hm^{-2})	托克托县	−128.07±5.05d	−57.93±3.44c	9.94±4.03b	85.46±0.89a
		磴口县	−108.56±5.23d	−50.19±5.77c	15.37±2.97b	92.06±4.55a
	表观盈余率/%	托克托县	−100±0.00d	−43.55±1.45c	7.16±3.09b	61.25±1.03a
		磴口县	−100.00±0.00d	−40.00±2.76c	11.45±2.49b	69.38±5.90a
磷表观平衡	总投入量/(kg·hm^{-2})	托克托县	240	240	240	240
		磴口县	240	240	240	240
	总携出量/(kg·hm^{-2})	托克托县	27.14±0.80c	31.29±0.47a	31.68±0.78a	28.54±0.54b
		磴口县	18.66±0.90b	22.75±1.76a	22.67±1.64a	17.62±0.77b
	表观平衡值/(kg·hm^{-2})	托克托县	212.86±0.80a	208.71±0.47c	208.32±0.78c	211.46±0.54b
		磴口县	221.34±0.90a	217.25±1.76b	217.33±1.64b	222.38±0.77a
	表观盈余率/%	托克托县	784.97±25.68a	667.07±11.50c	657.94±18.77c	741.11±15.95b
		磴口县	1188.08±62.57a	959.12±82.70b	962.24±78.28b	1263.68±58.95a
钾表观平衡	总投入量/(kg·hm^{-2})	托克托县	120	120	120	120
		磴口县	120	120	120	120
	总携出量/(kg·hm^{-2})	托克托县	151.18±6.31b	167.59±2.25a	155.89±4.38b	138.67±2.52c
		磴口县	95.85±5.56a	94.74±5.34a	89.71±1.72a	87.70±6.53a
	表观平衡值/(kg·hm^{-2})	托克托县	−31.18±6.31b	−47.59±2.25c	−35.89±4.38b	−18.67±2.52a
		磴口县	24.15±5.56a	25.26±5.34a	30.29±1.72a	32.30±6.53a
	表观盈余率/%	托克托县	−20.53±3.29b	−28.39±0.96c	−22.98±2.17b	−13.44±1.56a
		磴口县	25.47±7.07a	26.93±6.98a	33.80±2.57a	37.36±10.65a

注：表中数据为平均值±标准误(n=3)；不同小写字母表示不同施氮水平油莎豆养分表观平衡差异显著(P<0.05)。

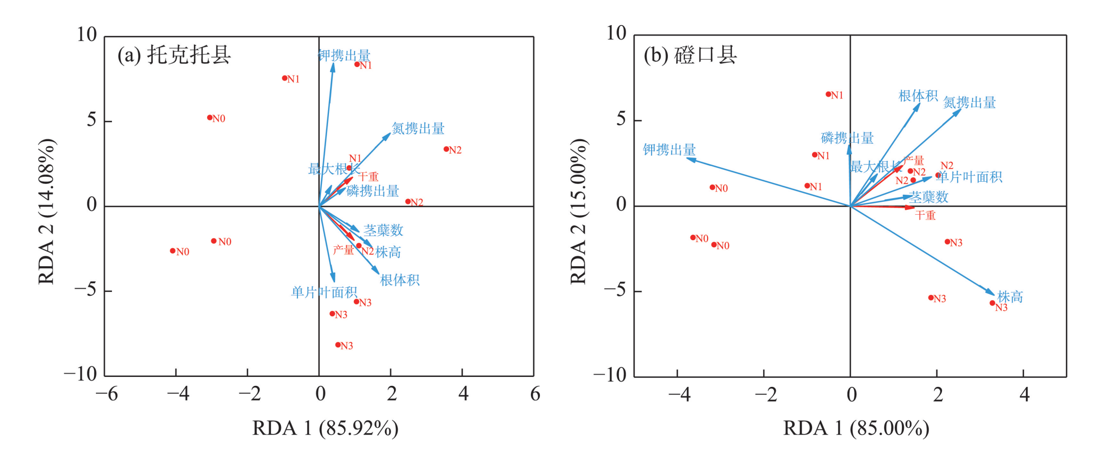


图1 托克托县(a)、磴口县(b)油莎豆干重、产量与农艺性状、养分携出的冗余分析

Fig. 1 RDA analysis of dry weight, yield, agronomic traits and nutrient uptake of *Cyperus esculentus* in Toketo County (a) and Dengkou County (b)

重、产量进行冗余分析,可以表明油莎豆农艺性状、养分携出对干重、产量之间的影响。其中托克托县轴1(RDA-1)和轴2(RDA-2)解释率分别为85.92%和14.08%;磴口县轴1(RDA-1)和轴2(RDA-2)解释率分别为85.00%和15.00%。从中可知,托克托县试验中,氮携出量、磷携出量、最大根长;株高、根体积、最大根长、磷携出量、氮携出量是驱动油莎豆干物质及块茎产量形成的主要因素,其次为单片叶面积、钾携出量;而磴口县试验中,茎蘖数、根体积、单片叶面积、最大根长、氮携出量是驱动油莎豆干物质及块茎产量形成的主要因素,其次为株高、磷携出量、钾携出量。其中两地数据均表明油莎豆茎蘖数、最大根长、根体积、氮携出量与油莎豆干物质及块茎产量显著正相关。这说明良好的农艺性状及氮素的吸收有助于油莎豆增产,合理的氮肥施入会促进油莎豆对营养元素的吸收,从而为油莎豆干物质及产量的积累提供物质基础。

3 讨 论

3.1 不同施氮水平对油莎豆农艺性状的影响

肥料会不同程度的影响作物生长发育,进而影响作物农艺性状及产量[18]。氮素是一切有机体不可缺少的元素,在作物生长发育中更是担当着必要角色。缺氮作物体内新细胞的合成将受到抑制,生长发育缓慢或停止[19]。氮素一般对作物叶片发育的影响最大,缺氮时作物地上部和地下部根系的生长都将受到抑制[20],而充足的氮素可促进作物发育健壮,加速叶片生长。Jerusha 等[21]研究表明施用100%氮的玉米穗轴/株数(3)、行数(14.47)、籽粒/行数(28.27)、产量(4.05 t·hm^{-2})等显著高于其他处理。但施入的氮不是越多越好,过多时对作物会产生不良影响。吴子帅等[22]研究发现氮素水平过高会引起作物营养元素的不均衡,物质合成与转运能力降低,导致水稻徒长倒伏,产量品质下降。本研究发现,与不施氮肥水平(N0)相比施氮肥水平均可以改善两地油莎豆农艺性状,且株高、茎蘖数、单片叶面积地上部农艺性状,在施氮量0~225 kg·hm^{-2}范围内随着施氮量的增加而增加,且与N0水平差异显著。前人在不同氮环境下通过研究玉米、水稻等作物发现,其可以通过改变根系构型来响应根际氮环境的变化[23-24]。本研究中最大根长、根体积地下部农艺性状,在施氮量0~150 kg·hm^{-2}范围内随着施氮量的增加而增加,在N2水平下达到最大值,且与N0水平差异显著。这表明良好根系构型是提高作物养分高效吸收的重要途径,油莎豆可以在低氮环境中通过增加最大根长、根体积来提高对氮的吸收,而在较高的环境中减少最大根长、根体积进一步调节对氮的吸收,以平衡植物营养。因此合理的氮施入水平,可改善油莎豆农艺性状,提高油莎豆产量,从而获得良好的经济效益。

3.2 不同施氮水平对油莎豆产量的影响

影响作物产量及其构成的诸多因素中,肥料是最有效和作用最快的变量[25],并可通过影响作物的群体结构及其生产性能等多种因素,最终影响和制约作物的产量[26-27]。油莎豆产量取决于地下块茎的膨大程度及数量,而植株的生长状态直接影响块茎

的膨大和养分的积累。沈庆雷[11]研究发现随施氮量的增加,油莎豆茎鞘、叶片等地上部干物质量呈增加趋势,但油莎豆产量并未呈增加趋势,在施氮量为67.5 kg·hm^{-2}时产量最高。孙佳尧等[28]研究表明当施氮量为120 kg·hm^{-2}时,油莎豆叶片生理性状、籽粒品质及产量各性状达到最大。本研究发现,随着施氮量的增加,油莎豆整株干重和块茎产量均表现为先升高后降低的趋势,在N2水平下达到最大,干重分别为132.40 g·株$^{-1}$、138.81 g·株$^{-1}$,块茎产量分别为9298.87 kg·hm^{-2}、10336.06 kg·hm^{-2}。说明氮能延缓作物叶片衰老,延长光合作用时间,从而延长作物籽粒灌浆时间[29]。而氮肥施入过多(N3),会造成油莎豆地上部营养生长旺盛,无效分蘖增加,光合产物向地下部茎根运输减少,从而导致地下部块茎灌浆不充分、结实率低、产量下降[30]。此外在相同施氮水平下,托克托县的产量低于磴口县,可能是由于托克托县土地存在盐渍化的问题[31]。也有研究盐碱胁迫下植株整体K含量明显升高,以抵御盐碱胁迫[32]。

3.3 不同施氮水平对养分平衡的影响

土壤养分收支平衡反映了农田土壤养分需求和平衡状况,对日后农田养分资源管理和科学施肥起到关键的指导作用[33]。我国主要农作物的施肥量一般通过测土配方施肥与作物目标产量的养分消耗量来计算,而油莎豆目前的施氮量是多依靠经验或参照生长发育类似的作物,这容易导致土壤氮素大量残留及钾素亏缺。因此需要明确合理施氮量,在提高肥料利用率的同时降低了肥料的损失和对环境的污染[34]。

本研究中,两试验地数据表明随着施氮量的增加,油莎豆氮素携出量均表现为先增加后下降的趋势,均在N2水平下达到最大。氮素表观平衡值大小两地均表现为N3>N2>N1>N0,氮素表观盈余率在N0和N1水平下为负值,N2和N3水平下为正值。表明两地均在N2水平下达到氮素平衡状态。后续可为作物提供营养,在一定意义上提高了土壤氮素的供应潜力。王建国等[35]研究表明,氮素盈余率大于20%时,有可能会对环境造成危害,因此合理的氮施入对保护生态环境有着重要意义。本研究中钾盈余率也在鲁如坤等[36]提出的30%~50%允许钾盈余的合理范围。但磷素表观盈余量较大,可能是磷素损失及固定等原因有关[37-38],后期也会针对这一问题开展相关试验研究。

同时,油莎豆干重、产量与农艺性状及养分携出的冗余分析结果均表明油莎豆茎蘖数、最大根长、根体积、氮携出量与油莎豆干物质及块茎产量显著正相关。这说明良好的农艺性状及氮素的吸收有助于油莎豆增产,合理的氮肥施入会促进油莎豆对养分的吸收,从而为油莎豆干物质及产量的积累提供物质基础。

4 结 论

施氮会改善油莎豆茎蘖数、株高、单片叶面积等农艺性状。在N2水平下,即施氮量为150 kg·hm^{-2}时,两地油莎豆最大根长、根体积等农艺性状最优,且与不施肥水平差异显著。此外施肥会提高油莎豆整株干重及块茎产量,并在N2水平下油莎豆整株干重及块茎产量均最高,块茎产量可达到9298.87~10336.06 kg·hm^{-2}。两地氮素表观盈余率在N0和N1水平下为负值,N2和N3水平下为正值,表明两地氮素均在N2水平,即施氮量为150 kg·hm^{-2}时达到氮素平衡状态。根据本试验设计,在北方沙质土壤,N素施入量为150 kg·hm^{-2}左右时,有利于油莎豆生长发育和产量的形成,可促进油莎豆对养分的吸收,维持土壤养分平衡。

参考文献(References):

[1] 廖贵云, 吴秀芹, 谭锦, 等. WEPS模型在乌兰布和沙漠油莎豆(*Cyperus esculentus*)种植区的应用[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1504-1513. [Liao Guiyun, Wu Xiuqin, Tan Jin, et al. Application of Wind Erosion Prediction System in the Ulan Buh Desert *Cyperus esculentus* planting area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1504-1513.]

[2] Duman E. Some physico-chemical properties, fatty acid compositions, macro-micro minerals and sterol contents of two variety tigernut tubers and oils harvested from East Mediterranean region [J]. Food Science and Technology, 2019, 39(2): 610-615.

[3] Follak S, Belz R, Bohren C, et al. Biological flora of Central Europe: *Cyperus esculentus* L. [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2016, 23: 33-51.

[4] Akabassi G C, Palanga K K, Padonou E A, et al. Biology, production constraints and uses of *Cyperus exculentus* L. (neglected and underutilized crop species), implication for valorization: A review [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2022, 69: 1979-1992.

[5] 曹秭琦, 任永峰, 路战远, 等. 油莎豆的特性及其开发利用研究进展[J]. 北方农业学报, 2022, 50(1): 66-74. [Cao Ziqi, Ren

Yongfeng, Lu Zhanyuan, et al. Research progress on the characteristics and development and utilization of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of North Agriculture, 2022, 50(1): 66−74.]

[6] 赵小庆, 刘和, 路战远, 等. 沙化退化土地油莎豆防风固沙栽培技术[J]. 现代农业, 2019, 45(6): 12−13. [Zhao Xiaoqing, Liu He, Lu Zhanyuan, et al. Cultivation techniques of *Cyperus esculentus* L. in sandy degraded land[J]. Modern Agriculture, 2019, 45(6): 12−13.]

[7] Tumbleson M E, Kommedahl T. Reproductive potential of yellow nutgrass[J]. Weed, 1961(9): 646−653.

[8] 王晓婧. 不同小麦品种氮素吸收利用特性和品质差异分析[D]. 泰安: 山东农业大学,2017. [Wang Xiaojing. Study on the Difference of Nitrogen Use Efficiency and Quality in the Different Wheat Varieties[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.]

[9] Maheswari M, Murthy A N, Shanker A K. Nitrogen Nutrition in Crops and Its Importance in Crop Quality[M]. The Indian Nitrogen Assessment, Amsterdam: Elsevier, 2017.

[10] Alpina A, Rafiqul I M, Islam M, et al. Methods of urea fertilizer application influence growth, yield, and nitrogen use efficiency of transplanted Aman rice[J]. Water, 2022, 14(21): 3539−3539.

[11] 沈庆雷. 油莎豆高产优质栽培初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010. [Shen Qinglei. A Preliminary Studies on High Yield and Quality Cultivation in Chufa[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010.]

[12] 曹哲, 何文寿, 侯贤清, 等. 不同施氮量对马铃薯养分吸收及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1600−1605. [Cao Zhe, He Wenshou, Hou Xianqing, et al. Effects of different nitrogen application rates on nutrient uptake and yield of potato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(7): 1600−1605.]

[13] 石晓华, 杨海鹰, 康文钦, 等. 不同施氮量对马铃薯−小麦轮作体系产量及土壤氮素平衡的影响[J]. 作物杂志, 2018, 34(2): 108−113. [Shi Xiaohua, Yang Haiying, Kang Wenqing, et al. Effects of nitrogen fertilization on crop yields and soil nitrogen balance in potato-wheat system[J]. Crops, 2018, 34(2): 108−113.]

[14] 马鹏, 李红, 黄长虹, 等. 土壤养分平衡与农业施肥的关系探究[J]. 农家参谋, 2022, 40(14): 19−21. [Ma Peng, Li Hong, Huang Changhong, et al. Exploring the relationship between soil nutrient balance and agricultural fertilization[J]. The Farmers Consultant, 2022, 40(14): 19−21.]

[15] 李变变, 张凤华, 赵亚光, 等. 不同刈割程度对油莎豆非结构性碳水化合物代谢及生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 101−113. [Li Bianbian, Zhang Fenghua, Zhao Yaguang, et al. Effects of different clipping degrees on non-structural carbohydrate metabolism and biomass of *Cyperus esculentus*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 101−113.]

[16] 杨钰洁, 梁国玲, 刘文辉, 等. 硅肥对青藏高原高寒地区燕麦抗倒伏性状及种子产量的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(3): 551−561. [Yang Yujie, Liang Guoling, Liu Wenhui, et al. Effects of silicon fertilizer on lodging resistance traits and seed yield of *Avena sativa* in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(3): 551−561.]

[17] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 812−820. [Fu Wei, Liu Kunping, Chen Hongsong, et al. Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 812−820.]

[18] Janmohammadi M, Abdoli H, Sabaghnia N, et al. The effect of iron, zinc and organic fertilizer on yield of chickpea(*Cicer artietinum* L.) in Mediterranean climate[J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2018, 66(1): 49−60.

[19] 卢发光. 种植密度和施氮量对沿海盐碱地紫花苜蓿生长、生理、产量和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [Lu Faguang. Effects of Planting Density and Nitrogen Application Rate on Growth, Physiology, Yield and Quality of Alfalfa in Coastal Saline-Alkali Land[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]

[20] Leghari S J, Wahocho N A, Laghari G M, et al. Role of nitrogen for plant growth and development: A review[J]. Advances in Environmental Biology, 2016, 10(9): 209−218.

[21] Jerusha B M, Singh S. Effect of nitrogen levels and seaweed extract (*Kappaphycus alvarezii*) on growth and yield of summer maize (*Zea mays* L.)[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2022, 34(22): 1313−1321.

[22] 吴子帅, 李虎, 黄秋要, 等. 施氮量和栽插密度对桂育11号产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 154−162. [Wu Zishuai, Li Hu, Huang Qiuyao, et al. Influences of nitrogen fertilizer application rate and planting density on the yield and rice quality of Guiyu 11[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(8): 154−162.]

[23] Gao K, Chen F J, Yuan L X, et al. A comprehensive analysis of root morphological changes and nitrogen allocation in maize in response to low nitrogen stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2015, 38(4): 740−750.

[24] 胡仁, 肖大康, 丁紫娟, 等. 根区施氮对水稻苗期根系生长及分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(22): 93−99. [Hu Ren, Xiao Dakang, Ding Zijuan, et al. Impacts of nitrogen application in root zone on root growth and distribution of rice at seeding stage [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(22): 93−99.]

[25] Silva P H M, Poggiani F, Libardi P L, et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 301(1): 67−78.

[26] Moe K, Moh S M, Htwe A Z, et al. Effects of integrated organic and inorganic fertilizers on yield and growth parameters of rice varieties[J]. Rice Science, 2019, 26(5): 309−318.

[27] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37

(6): 1569-1579. [Sun Yimei, Tian Qing, Lv Peng, et al. Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf traits and productivity in a semi- arid sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1569-1579.]

[28] 孙佳尧, 李志刚, 孟祥军, 等. 氮肥处理下油莎豆叶片生理特性和籽粒品质与产量相关研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 327- 332. [Sun Jiayao, Li Zhigang, Meng Xiangjun, et al. Correlation between leaf physiological characteristics, grain quality and yield of *Cyperus esculentus* under nitrogen treatment[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University(Natural Sciences), 2020, 35(4): 327-332.]

[29] 杨晓龙, 方建军, 汪本福, 等. 不同施氮量对桃优香占产量及农艺性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(15): 34-37. [Yang Xiaolong, Fang Jianjun, Wang Benfu, et al. Effects of different nitrogen amounts on yield and agronomic characters of Taoyouxiangzhan[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60 (15): 34-37.]

[30] 朱紫娟. 稻麦轮作体系秸秆还田与氮肥梯度效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [Zhu Zijuan. Study on the Effect of Straw Returning and Nitrogen Fertilizer Gradient in Rice-Wheat Rotation System[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]

[31] 李全英, 李海波. 内蒙古托克托县盐碱地适宜种植水稻品种筛选[J]. 中国稻米, 2020, 26(6): 109-111, 113. [Li Quanying, Li Haibo. Screening of rice varieties suitable for saline-alkali land planting in Toketo County, Inner Mongolia[J]. China Rice, 2020, 26(6): 109-111, 113.]

[32] 王园园. 丛枝菌根真菌和钾调控宁夏枸杞耐盐及钾吸收机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [Wang Yuanyuan. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Potassium Regulate the Salt Tolerance and Potassium Absorption Mechanism of *Lycium barbarum*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.]

[33] 姜茜, 孙炜琳, 朱立志. 浙江省农田养分平衡的时空变化及环境风险分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(2): 335-344. [Jiang Qian. Sun Weilin, Zhu Lizhi. Analysis of temporal and spatial variations of nutrient balance and its environmental risk in Zhejiang Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2): 335-344.]

[34] 张磊, 王立春, 孔丽丽, 等. 不同施肥模式下春玉米养分吸收利用和土壤养分平衡研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1169-1176. [Zhang Lei, Wang Lichun, Kong Lili, et al. Nutrient utilization and soil nutrient balance of spring maize under different fertilizer application modes [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1169-1176.]

[35] 王建国, 王德禄, 王守宇, 等. 黑龙江农田养分平衡和养分水平的动态变化[J]. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(2): 124-127. [Wang Jianguo, Wang Delu, Wang Shouyu, et al. Dynamic variation of the farmland nutrient's balance and its content in Heilongjiang Provience[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2000, 16(2): 124-127.]

[36] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67. [Lu Rukun, Shi Zhengyuan, Shi Jianping. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63-67.]

[37] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 971-979.

[38] 杨红宾, 王胜, 殷溶, 等. 紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1316-1326. [Yang Hongbin, Wang Sheng, Yin Rong, et al. Effects of crop-mulberry system on phosphorus loss in sloping cropland with purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(6): 1316-1326.]

Effects of different nitrogen levels on the apparent soil nutrient balance and tuber yield of *Cyperus esculentus* farmland

CAO Ziqi[1], LU Zhanyuan[1], REN Yongfeng[1], ZHAO Xiaoqing[1], WANG Jianguo[1], HOU Zhihui[1], HAN Yunfei[1], WANG Dengyun[2], SHANG Xueyan[2], DUAN Rui[2]

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Agricultural and Animal Husbandry Technology Promotion Center of Dengkou County, Bayannur 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study aimed to investigate the apparent soil nitrogen balance and tuber yield of *Cyperus esculentus* in sandy farmland under different levels of nitrogen application and provide a theoretical basis for increasing the yield of *Cyperus esculentus* in sandy farmland. Four nitrogen fertilizer treatments, 0 kg·hm^{-2} (N0), 75 kg·hm^{-2} (N1), 150 kg·hm^{-2} (N2), and 225 kg·hm^{-2} (N3), were applied to *Cyperus esculentus* in 2021 at the experimental site in Dengkou County, Bayannur City, Inner Mongolia, and Toketo County, Inner Mongolia Academy of Agricultural Sciences, Hohhot, China. The effects of the four different N application levels on agronomic traits, tuber yield, and clear soil nutrient balance of *Cyperus esculentus* were analyzed. The number of tillers, plant height, and single leaf area of *C. esculentus* increased alongside increasing N application, but excessive N application caused above-ground growth of *C. esculentus*, resulting in lower yield. At the application rate of 150 kg·hm^{-2} (N2), *Cyperus esculentus* exhibited superior agronomic traits, including maximum root length and root volume, the highest whole plant dry weight and tuber yield, and a fresh tuber yield of 9298.87 kg·hm^{-2}. The apparent nitrogen surplus rates in the two locations were negative at the levels of 0 kg·hm^{-2} (N0) and 75 kg·hm^{-2} (N1) and positive at the levels of 150 kg·hm^{-2} (N2) and 225 kg·hm^{-2} (N3). This pattern indicates that nitrogen reached a balanced state at the N2 level in both locations, signifying an optimal nitrogen application rate of 150 kg·hm^{-2}. RDA analysis showed that tiller number, plant height, single leaf area, maximum root length, root volume, and nitrogen uptake were the main factors driving the formation of dry matter and tuber yield in *C. esculentus*. Therefore, in northern sandy soil conditions, the application of N at 150 kg·hm^{-2} can promote the absorption of nutrients by *Cyperus esculentus* and maintain the apparent nutrient balance of soil, which is conducive to the growth, development, and yield formation of *Cyperus esculentus*.

Keywords: *Cyperus esculentus*; nitrogen application levels; agronomic traits; tuber yield; soil apparent nutrient balance